ISSN (Print) 1598-5385
ISSN (Online) 2233-6648
≪연구논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society 31(5), 214-218 (2021) https://doi.org/10.4283/JKMS.2021.31.5.214

How to Get a Switching Phase Diagram of Macrospins in One Step

Kyoung-Woong Moon*
Quantum Spin Team, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 34113, Korea

(Received 12 October 2021, Received in final form 19 October 2021, Accepted 20 October 2021)

When studying magnetization dynamics, the model assuming that all magnetization vectors are aligned is called a macrospin model. The macrospin model has been considered as a most convenient method to solve the magnetization dynamics. The conventional method of obtaining a phase diagram of macrospin is to perform individual simulations on various variables and then combine all the results. This requires a lot of time and effort. Here, we introduce a method that can confirm the dynamic characteristics of macrospin for various variable values at once through computational simulation. We present an example of obtaining a two-dimensional phase diagram of a macrospin to identify magnetization switching characteristics and presession conditions by spin torque.

Keywords : spin dynamics, macrospin, phase diagram, switching, reversal, spin torque, spintronics

마크로스핀의 스위칭 페이즈 다이아그램을 한번에 구하는 방법

문경웅*
양자스핀팀 한국표준과학연구원, 대전시 유성구 가정로 267, 31443

(2021년 10월 12일 받음, 2021년 10월 19일 최종수정본 받음, 2021년 10월 20일 게재확정)

자성동역학을 연구할 때, 모든 자화벡터들이 나란한 상태를 가정한 모델을 마크로스핀 모델이라고 부른다. 마크로스핀모델은 오직 한 개의 방향 벡터만 다루면 되기 때문에 자성동역학의 가장 기본적인 문제로 생각된다. 마크로 스핀의 스위칭 페이즈 다이아그램을 얻는 일반적인 방법은 다양한 변수에 대해 개별 시뮬레이션을 수행한 다음 모든 결과를 종합하여 나타내는 것이다. 따라서 많은 시간과 노력이 필요하다. 이번 논문에서는 전산모사를 통하여 다양한 변수에 대한 마크로스핀의 동역학적 특성을 한번에 확인할 수 있는 방법을 소개한다. 마크로스핀의 2차원 페이즈 다이아그램을 얻는 예제를 통해 스핀토크에 의한 자화 스위칭 특성 및 프리세션 조건을 확인하는 방법을 제시한다.

주제어 : 스핀동역학, 마크로스핀, 페이즈 다이아그램, 스위칭, 자화역전, 스핀토크, 스핀트로닉스

I. 서 론

자성체는 자성원자들로 구성된다. 이 때 자성원자들은 각자 아주 작은 막대자석을 가지고 있는 것으로 생각되곤 한다. 막대자석의 S극에서 N극의로의 방향을 자화벡터방향이라고 하는데, 대부분의 자성은 스핀에 의해 발생하기 때문에 다른 말로 스핀방향이라고도 부른다. 따라서 가장 단순한 자성체는 각각의 원자 위치마다 스핀방향이 하나씩 존재하는 격자형태로 상상할 수 있다.

이러한 스핀들의 모임인 자성체는 원칙적으로 엄청난 자유도를 가지고 있다. 각각의 스핀은 원자 속에 속박되어 있어서 위치의 자유도는 없는 대신 임의 방향을 향할 수 있는 자유도를 가진다. 따라서 자성체의 원자 개수가 아보가드로수에 가까우면 거의 무한에 가까운 자유도가 존재하고 이런 대상을 정확하게 설명하기란 보통 어렵다.

하지만 스핀들의 모임에는 강력한 규칙이 존재하여 문제를 단순하게 만들 수 있다. 이 규칙은 교환상호작용(exchange interaction)으로 알려져 있으며 흔히 관찰되는 강자성체가 왜 강자성체가 되는지를 설명해준다. 교환상호작용은 인접하고 있는 스핀간에 스핀정보를 주고 받는 것을 의미한다. 정보를 주고받는 모든 경로가 완전히 대칭을 이루는 경우 인접한 두 개의 스핀은 서로 평행 또는 반평행 상태를 선택하는데, 서로 평행상태를 좋아하는 자성체는 강자성체가 된다. 인접하는 스핀은 평행해야 한다는 구속조건이 자성체 전체에 적용되면 오직 한 개의 스핀방향으로 전체 자화상태를 나타낼 수 있으

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.
*Corresponding author: Tel: +82-42-868-5397,
Fax: +82-42-868-5827, e-mail: kwmoon@kriss.re.kr

며 이러한 해석을 마크로스핀(macrospin) 이라고 한다[1-3].

마크로스핀은 강자성체의 자화상태를 해석하는데 있어 가장 기본적인 접근방법이다. 강자성에 의해 모든 스핀들이 나란하게 정렬되어 있는 상태가 강자성체에서는 흔히 보이는 자화상태이기 때문이다. 이 외에도 마크로스핀은 작은 소자에는 더 큰 의미를 가진다. 왜냐하면 소자의 크기가 충분히 작아져서 교환상호작용 길이와 비교할 수준이 되면 모든 스핀들은 서로 어긋난 각도를 가지기 힘들어진다. 이러한 상황에서 마크로스핀은 훌륭한 접근방법이 된다. 또한 보통의 자성소자들은 고집적소자를 추구하고 있고 이를 위해 자성체는 점점 더 작아져야 한다[4-7]. 따라서 자성소자들을 더 작게 만들수록 마크로스핀 모델을 통한 접근은 더 중요해질 것이다.

이번 논문에서는 주어진 외부 조건에 대해 마크로스핀이 반응하는 특성을 2차원 페이즈 다이아그램(phase diagrame)으로 한번에 나타내는 방법을 소개하고자 한다. 이를 위해 자성성 동역학을 계산해주는 전산모사프로그램인 MuMax3를 활용하였다[8]. 이번에 소개하는 방법을 통해 사무용 컴퓨터에서도 마크로스핀의 페이즈 다이아그램을 수분 이내로 확인해 볼 수 있을 것이다.

페이즈 다이아그램을 얻는 기존의 방법은 다양한 변수에 대해 개별적인 시뮬레이션을 모두 수행한 다음에, 그 결과를 종합하여 나타내는 과정을 거치기 때문에 시간과 노력이 많이 요구된다. 이를 해결하기 위한 핵심 아이디어는 두가지이다. 첫째, 시뮬레이션을 수행할 때 교환상호작용과 쌍극자(dipole)의 작용을 없도록 설정한다. 둘째, MuMax3의 mask기능을 활용하여 자성체의 x 축과 y 축에 조건의 분포를 준다. 이 두가지 사항이 어떻게 작용하는지 MuMax3의 예제 파일을 통해 설명할 것이다.

II. 스핀동역학

예제를 소개하기 앞서 MuMax3에서 계산하는 스핀동역학에 대해 간단히 소개하고자 한다. 강자성체의 스핀동역학은 다음과 같은 란다우-리프쉬츠-길버트(Landau-Lifshitz-Gilbert, LLG) 공식을 바탕으로 기술된다[3,8-11].

$$\dot{\mathbf{m}} = -\gamma\mathbf{m}\times\mathbf{B}_{\mathbf{eff}} + \alpha\mathbf{m}\times\dot{\mathbf{m}} + \gamma\tau_d\mathbf{m}\times(\boldsymbol{\sigma}\times\mathbf{m}) - \gamma\tau_f\mathbf{m}\times\boldsymbol{\sigma} \qquad (1)$$

$\mathbf{m}$은 크기가 1이며 자화방향을 나타내는 벡터, $\dot{\mathbf{m}}$ 은 $\mathbf{m}$의 시간에 대한 미분, γ는 자기회전비율(gyromagnetic ratio), $\mathbf{B}_{\mathbf{eff}}$는 유효자기장벡터, α는 감쇄상수를 나타낸다. 식(1)의 오른편 마지막 두 항은 스핀토크의 작용을 나타낸다. $\boldsymbol{\sigma}$는 자성체에 주입되고 있는 스핀들의 스핀방향을 나타내는 단위 벡터이다. τ_d와 τ_f는 각각 유사감쇄토크(daping-like torque)와 유사자기장토크(field-like torque)를 나타내며 둘 다 전류에 비례한다.

III. MuMax3 예제

MuMax3는 오픈소스 프로그램이다[8]. MuMax3를 통한 시뮬레이션은 mx3 라는 확장자를 가진 파일로 문제를 정의한다. 이 파일들은 Windows의 기본프로그램인 메모장 및 워드패드로 열어서 편집이 가능하다. 다음은 이번 논문에서 사용한 예제이다. //로 표시된 부분은 시뮬레이션이 수행될 때 무시되는 부분으로 예제에 대한 설명을 적어 두었다. 전체 자성체는 가로, 세로, 두께가 모두 1 nm인 정육면체 셀들로 구성되어 있다. 셀들이 모여서 얇은 정사각형 판을 이루고 있다. 각각의 셀은 각자의 스핀방향을 가지고 있다.

```
Nx := 200          //Number of Cell on x-axis
Ny := 200          // Number of Cell on y-axis
c := 1e-9          //Cell size
SetGridsize(Nx, Ny, 1)  //Grid size in xyz coordinate
SetCellsize(c, c, c)    //Unit cell
Jmax := 2*1.51928e12    //Max current (A/m^2)
Jmin := -2*1.51928e12   //Min current (A/m^2)
Hxmax := 2         //Max external x-field (T)
Hxmin := -2        //Min external x-field (T)
Msat   = 1000e3         //Magnetization (A/m)
Ku1 = 5e5          //Anisotropy energy (J/m^3)
anisU = vector(0,0,1)   //Anisotropy direction, z
Aex    = 0.0       //Exchange energy (J/m)
B_ext = Vector(0, 0, 0)  //Uniform external field (T)
alpha = 0.1        //Damping constant
fixedlayer = vector(0, 1, 0)     //Pumped spin direction
NoDemagSpins = 1   //Turn off dipole-dipole interaction
//m = uniform(0,0,1)    //uniform +z magnetization
mask1 := newVectorMask(Nx, Ny, 1)
mask2 := newVectorMask(Nx, Ny, 1)
for i:=0; i<Nx; i++{
for j:=0; j<Ny; j++{
        r := index2coord(i, j, 0)
        x := r.X()
        y := r.Y()
        Jz := (x+Nx*c/2)/(Nx*c)*(Jmax-Jmin)+Jmin
        Hx := (y+Ny*c/2)/(Ny*c)*(Hxmax-Hxmin)+Hxmin
        mask1.setVector(i, j, 0, vector(0, 0, Jz))
        mask2.setVector(i, j, 0, vector(Hx, 0, 0))
        }
}
J.add(mask1, 1) //Set current on image x-axis
B_ext.add(mask2, 1)    //Set x-field on image y-axis
run(100e-9)
```

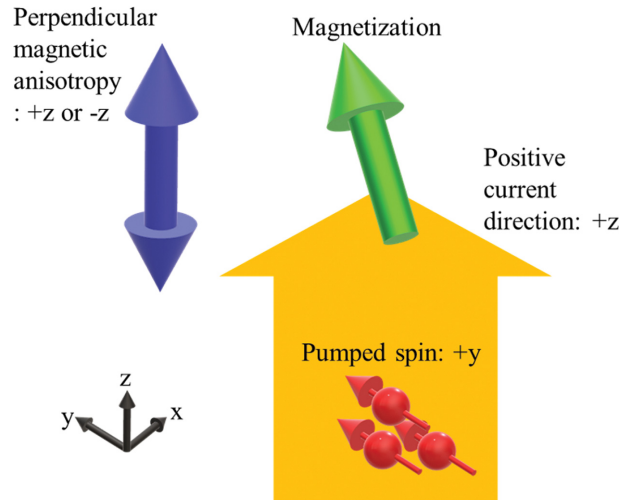

Fig. 1. (Color online) Directions used in this paper.

이 예제에서 가장 중요한 사항은 교환상호작용의 크기를 0으로 설정하고 쌍극자작용을 무시하도록 하여 인접한 셀들은 완전히 독립되어 있다는 점이다. 다시 말해, 각각의 셀은 모두 독립적인 마크로스핀이 된다.

또한 구조체의 가로(x)축으로는 mask1을 통해서 수직전류(J_z)의 크기가 음의 값부터 양의 값까지 분포되도록 설정되어 있다. 이 수직 전류는 스핀을 마크로스핀에 주입하는 역할을 한다. 세로(y)축으로는 mask2를 통해서 x 방향의 외부자기장(H_x)의 세기가 음의 값부터 양의 값까지 설정되어 있다. 이러한 설정을 통해 각각의 마크로스핀들은 각각 다른 수직전류와 외부자기장을 느끼게 된다.

예제가 가정하고 있는 사항을 더 설명하면 다음과 같다. 자성벡터는 아무런 외부 자극이 없을 때 수직방향(+z 또는 –z)을 선호한다. 수직방향의 이방성의 세기를 자기장으로 환산하면 1 T의 크기를 가진다. 마크로스핀에 y 방향의 스핀이 주입되고, 스핀들을 주입하는 전류는 값이 양수일 때 +z 방향으로 흐른다. 여기서 정의되는 벡터들의 방향을 Fig. 1에 나타내었다. 논의를 단순하게 하기 위해 주입된 스핀들에 의한 유사감쇄토크(damping-like torque)만 고려하고 유사자기장토크(field-like torque)는 무시한다. 초기자화상태는 아무런 설정을 하지 않았기 때문에 무작위 방향들이 임의로 설정된다.

IV. 마크로스핀의 스위칭 페이즈 다이아그램

시뮬레이션을 실행하면 마크로스핀의 페이즈 다이아그램이 얻어진다. mx3 확장자를 가진 파일을 더블클릭하거나 mumax3.exe를 통해 실행시키면 시뮬레이션이 시작된다. 시뮬레이션이 수행되는 상황은 http://localhost:35367로 접속하면 볼 수 있다. 필자는 http://127.0.0.1:35367/로 접속하여 확인

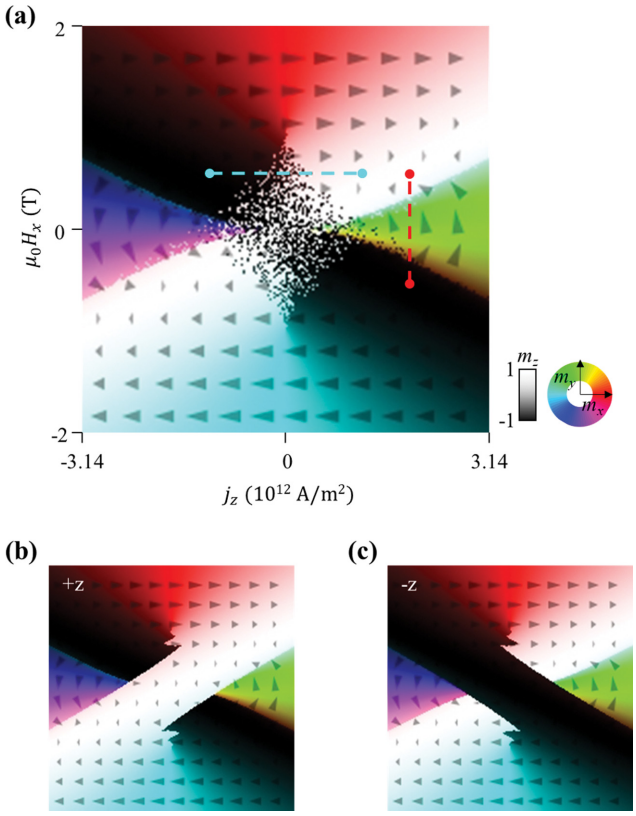

Fig. 2. (Color online) Phase diagrams obtained from (a) the random initial state, (b) the + z uniform state, and (c) the – z uniform state.

하였다. 예제 파일을 실행하면 무작위 자화방향들은 점차 안정된 상태를 찾아간다. 안정된 상태로부터 마크로스핀이 주어진 전류와 자기장의 세기에 따라 어떠한 상태를 선호하는지 쉽게 확인할 수 있다. Fig. 2(a)는 안정된 자화상태를 보여준다. 여기서 다시 한번 강조하지만 Fig. 2(a)는 사각형 판 모양의 자성체를 나타내는 것이 아니라 각각의 외부 변수에 따른 안정된 자화상태를 나타내는 페이즈 다이아그램이다. 무지개색깔과 회색삼각형들은 xy평면상의 자화방향을, 회색스케일은 z 축방향의 자화성분을 나타낸다. 전류가 없고 수평자기장이 1 T를 넘는 영역에서는 완전한 수평자화상태가 형성된다. 수평자기장이 없는 상태에서 y 방향의 스핀들을 충분히 주입시키면 주입된 스핀방향과 나란한 자화상태가 형성된다. Fig. 2(a)의 중간영역에는 검은색과 하얀색의 독립된 픽셀들이 빼곡하게 섞어 있고 이는 +z 또는 –z 자화상태가 둘다 안정적으로 존재가능함을 의미한다.

이러한 페이즈 다이아그램으로부터 자화상태의 기본적인 스위칭 특성을 추측할 수 있다. Fig. 2(a)의 하늘색 점선은 외부자기장이 일정하게 인가되고 전류 값이 변화하는 상황을 나타낸다. 이 선 위에서 전류 값이 연속적으로 변하는 상황을 생각해보자. 전류 값이 0부근에서 특정 값보다 작으면 +z와

–z가 모두 존재 가능하므로 설정되어 있던 이전의 자화방향을 유지한다. 만약 전류 값이 특정 값을 넘는 순간 +z와 –z 중에 오직 한 개의 방향만 선택된다. 따라서 전류방향에 따른 자화스위칭이 가능하다. 스위칭이 발생하는 영역을 좀 더 정확히 보려고 한다면 초기 자화방향을 +z로 설정(Fig. 2(b))하거나 –z로 설정(Fig. 2(c))해서 시뮬레이션을 수행하면 된다. 이를 통해 어느 조건에서 ± z 자화상태가 ∓ z 자화상태로 스위칭 되는지 알 수 있다. 이외에도 Fig. 2(a)의 빨간색 점선은 전류 값이 일정한 상태에서 자기장이 변화하는 상황을 보여준다. 이때는 수평자기장이 일정 이상 커지면 수직자화상태가 선택되지만 작으면 수평자화상태가 선택되는 것을 알 수 있다. 즉 자기장에 의해 + z, + y, – z 방향의 세가지 상태를 만들 수 있다. 페이즈 다이아그램에서 각 상태의 변화는 불연속적으로 발생할 것을 추측할 수 있다.

V. 마크로스핀의 지속적인 세차운동

마크로스핀은 외부에서 스핀이 계속 주입되는 경우 한 개의 상태로 안정되지 못하고 지속적인 세차운동을 하는 경우도 있다. 이러한 지속적인 세차운동 조건 역시 예제 파일을 응용하여 쉽게 찾아 볼 수 있다. 앞서 제시한 예제에서 mask2.setVector(i, j, 0, vector(Hx, 0, 0))의 부분을 수정하여 y 방향의 외부자기장이 인가되는 상황으로 바꿔볼 수 있고 그 결과를 Fig. 3(a)에 나타내었다. 우선 안정된 영역을 살펴보면, 이미지의 중간부분에 하얀색, 검은색 셀들이 섞여 있으므로 이 영역에서 + z 와 – z 자화상태가 둘다 안정적으로 존재가능하다. 전류가 충분히 큰 영역에서는 주입된 스핀 방향과 나란한 자화상태가 안정된다. 또한 자기장이 충분히 작용하는 경우에도 마크로스핀은 자기장방향으로 정렬된다.

Fig. 3(a)에서 특이한 사항은 시간을 아무리 기다려도 안정되지 못하고 셀의 색깔이 계속 변화하는 영역이 존재한다는 것이다. 이는 자화벡터가 시간에 따라 계속 회전하고 있음을 나타낸다. 이 결과를 논문의 그림으로는 확인하기 어렵고 직접 시뮬레이션을 수행해보면 쉽게 확인가능하다. 지속적인 회전이 발생하는 영역을 확인하는 또다른 방법은 시뮬레이션을 균일한 자화상태에서 시작하는 것이다. 이렇게 해주면 지속적인 자화회전이 발생하는 부분은 줄무늬가 생기며 계속 변화한다. Fig. 3(b)는 초기 자화를 + z로 설정했을 때 관찰되는 자화상태들의 예시이다. + y 자화상태와 – y 자화상태가 안정되는 영역 사이에 수직자화가 안정되어 고정되어 있는 부분도 있지만 자화상태가 그림마다 다른 부분이 있음을 확인할 수 있다.

참고로 여기서 추가된 y 방향 자기장은 이번 논문에서 가정한 상황에서 스핀이 발생시키는 유사자기장토크와 동일한

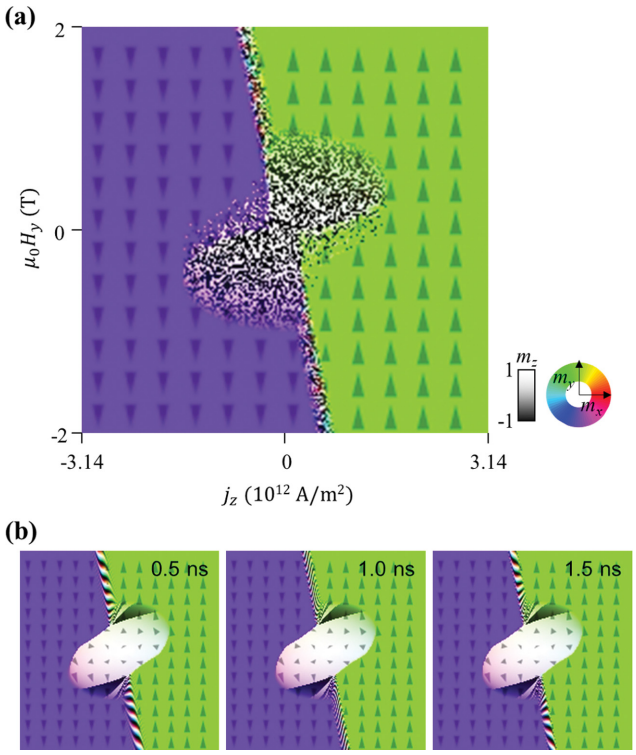

Fig. 3. (Color online) Phase diagrams obtained from (a) the random initial state. (b) Magnetization states started from the + z state.

역할을 한다. 즉, Fig. 3의 상황은 외부자기장 없이 오직 펌핑 된 스핀만 작용하는 상황과 수식으로 볼 때 동등하다. 따라서 Fig. 3은 스핀토크에 반응하는 마크로스핀의 일반적인 페이즈 다이아그램을 의미하기도 한다.

VI. 논의 및 결론

이번 논문에서는 마크로 스핀의 2차원 페이즈 다이아그램을 얻는 간단한 방법을 소개하였다. 예제에서는 가로와 세로로 각각 200개의 셀이 있지만 더 세밀한 분해능을 원한다면 셀 개수를 늘려도 된다. 아니면 외부 조건의 최대값과 최소값을 보려고 하는 범위의 값으로 한정하여 넣는 것도 방법이다.

여기서 보인 방법을 응용하여 3차원 페이즈 다이아그램을 얻는 것도 가능할 것이다. z 축방향으로도 셀을 나누고 mask를 추가하면 되기 때문이다. 하지만 셀의 개수가 많아지는 만큼 계산 시간이 느려지기 때문에 즉각적인 확인은 어려워질 수 있다.

모든 셀들을 독립적으로 만들기 위해 쌍극자 작용을 의도적으로 0으로 만들었다. 하지만 실제 자성체에는 쌍극자 작용이 반드시 존재하며 이에 의한 탈자화(demagnetization) 자기장이 발생한다. 비대칭적 구조에서 이러한 작용은 이방성 에너지가 3축에 대해 각각 다른 값을 가질 수 있는 것으로

환산할 수 있다. 만약 이방성 에너지가 각 축에 대해 다른 값을 가지는 것을 구현하려고 한다면 MuMax3의 Custom effective field terms를 활용하면 된다[8].

현재 MuMax3의 mask 기능은 전류, 자기장, 주입되는 스핀방향에만 적용가능하다. 따라서 다른 변수들(예를 들어 자화량, 이방성에너지 등)은 mask 기능을 사용할 수 없다. 하지만 DefRegion 함수를 사용하면 총 255개의 영역 설정이 가능하므로 영역에 따른 물성 값을 다르게 설정할 수 있을 것이다[8].

여기서 보인 방법 통해 모든 연구자들은 자신의 사무용 컴퓨터에서도 간단하게 마크로스핀의 페이즈 다이아그램을 얻을 수 있을 것이다. 이를 바탕으로 하여 마크로스핀에 대한 이론적 이해와 함께 메모리셀의 동작 특성 예측과 같은 응용적인 측면으로도 연구를 확장할 수 있기를 희망한다.

감사의 글

본 연구과제는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(NRF-2019M3F3A1A02072478, NRF-2021M3F3A2A01037663)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

[1] R. Lavrijsen, J. H. Lee, A. Fernández-Pacheco, D. C. M. C. Petit, R. Mansell, and R. P. Cowburn, Nature **493**, 647 (2013).
[2] J. Park, G. E. Rowlands, O. J. Lee, D. C. Ralph, and R. A. Buhrman, Appl. Phys. Lett. **105**, 102404 (2014).
[3] J. Xiao, A. Zangwill, and M. D. Stiles, Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys. **72**, 014446 (2005).
[4] S. Bhatti, R. Sbiaa, A. Hirohata, H. Ohno, S. Fukami, and S. N. Piramanayagam, Mater. Today **20**, 530 (2017).
[5] I. Žutić, J. Fabian, and S. Das Sarma, Rev. Mod. Phys. **76**, 323 (2004).
[6] V. K. Joshi, Eng. Sci. Technol. Int J. **19**, 1503 (2016).
[7] A. D. Kent and D. C. Worledge, Nat. Nanotechnol. **10**, 187 (2015).
[8] A. Vansteenkiste, J. Leliaert, M. Dvornik, M. Helsen, F. Garcia-Sanchez, and B. Van Waeyenberge, AIP Adv. **4**, 107133 (2014).
[9] R. Tomasello, E. Martinez, R. Zivieri, L. Torres, M. Carpentieri, and G. Finocchio, Sci. Rep. **4**, 6784 (2014).
[10] O. Boulle, S. Rohart, L. D. Buda-Prejbeanu, E. Jué, I. M. Miron, S. Pizzini, J. Vogel, G. Gaudin, and A. Thiaville, Phys. Rev. Lett. **111**, 217203 (2013).
[11] Z. Li and S. Zhang, Phys. Rev. Lett. **92**, 207203 (2004).